
MALONDIALDEHYDE (MDA) SEBAGAI PENANDA STRESS OKSIDATIF PADA TUBUH

Oleh

Rita Kirana

Poltekkes Kemenkes Banjarmasin

Email: kiranaritaari@gmail.com

Article History:

Received: 08-03-2025

Revised: 04-04-2025

Accepted: 11-04-2025

Keywords:

MDA, Stress Oksidatif

Abstract: *One biomarker that is often used to measure oxidative stress is Malondialdehyde (MDA). MDA is the end product of lipid peroxidation, which is the oxidation process of unsaturated fatty acids that occurs due to ROS attack on cell membranes. As a degradation product of lipid peroxidation, MDA has the potential to form adducts with various biomolecules such as proteins and DNA, which can cause cellular damage and impaired organ function (Marnett, 1999). Due to its reactive nature and easy detectability in biological samples, MDA is often used in research to measure the extent of oxidative damage and provide a clear picture of the extent to which oxidative stress affects the body. Malondialdehyde (MDA) has proven to be a very useful biomarker for measuring the level of oxidative stress in the body. As a product of lipid peroxidation, MDA provides a clear indication of the damage caused by ROS to cell membranes and other cellular components. Elevated MDA levels are often found in various degenerative diseases and medical conditions associated with oxidative stress, including cardiovascular diseases, diabetes, cancer, and neurodegenerative disorders. Therefore, measurement of MDA levels not only serves as an indicator of oxidative damage, but can also be used as a diagnostic and prognostic tool to monitor disease progression as well as the effectiveness of targeted therapies to reduce oxidative stress*

PENDAHULUAN

Stres oksidatif adalah kondisi fisiologis yang terjadi ketika produksi spesies oksigen reaktif (ROS) melebihi kapasitas tubuh untuk menetralsirnya dengan mekanisme antioksidan alami. ROS, seperti radikal bebas ($\text{OH}\cdot$, $\text{O}_2\cdot$), dapat merusak berbagai komponen seluler termasuk lipid, protein, dan DNA, yang berkontribusi pada perkembangan berbagai penyakit degeneratif, seperti penyakit kardiovaskular, diabetes mellitus, kanker, serta gangguan neurodegeneratif seperti Alzheimer dan Parkinson (Halliwell & Gutteridge, 2015). Oleh karena itu, penting untuk mengidentifikasi biomarker yang dapat digunakan untuk menilai tingkat stres oksidatif dalam tubuh.

Stres oksidatif merupakan kondisi ketidakseimbangan antara produksi spesies oksigen reaktif (ROS) dan kemampuan tubuh untuk menetralkan atau memperbaiki kerusakan yang disebabkan oleh ROS tersebut. ROS adalah molekul reaktif yang dapat merusak berbagai struktur seluler, termasuk lipida, protein, dan DNA. Jika tidak

dikendalikan dengan baik, stres oksidatif dapat berkontribusi pada perkembangan berbagai penyakit degeneratif, seperti penyakit jantung, diabetes, kanker, serta gangguan neurodegeneratif, seperti Alzheimer dan Parkinson. Stres oksidatif adalah kondisi ketidakseimbangan antara produksi spesies oksigen reaktif (ROS) dan kapasitas pertahanan antioksidan tubuh, yang dapat merusak sel-sel tubuh dan mempengaruhi kesehatan secara keseluruhan. Salah satu indikator utama yang digunakan untuk mengukur tingkat stres oksidatif dalam tubuh adalah malondialdehid (MDA), produk sampingan dari peroksidasi lipid. MDA telah diidentifikasi sebagai biomarker yang penting dalam berbagai penyakit degeneratif, kardiovaskular, neurodegeneratif, serta kondisi lainnya yang berhubungan dengan stres oksidatif.

Dalam rangka mendeteksi dan mengevaluasi tingkat stres oksidatif, para peneliti telah mengidentifikasi sejumlah biomarker yang dapat digunakan untuk menggambarkan kerusakan yang ditimbulkan oleh ROS. Salah satu biomarker yang paling banyak digunakan adalah malondialdehid (MDA), produk sampingan dari peroksidasi lipid. MDA terbentuk sebagai hasil dari reaksi antara ROS dengan asam lemak tak jenuh dalam membran sel, yang kemudian menghasilkan senyawa yang dapat merusak struktur seluler dan mempengaruhi fungsi biologis.

Salah satu biomarker yang sering digunakan untuk mengukur stres oksidatif adalah **Malondialdehyde (MDA)**. MDA adalah produk akhir dari peroksidasi lipid, yaitu proses oksidasi asam lemak tak jenuh yang terjadi akibat serangan ROS pada membran sel. Sebagai produk degradasi dari peroksidasi lipid, MDA memiliki potensi untuk membentuk adduk dengan berbagai biomolekul seperti protein dan DNA, yang dapat menyebabkan kerusakan seluler dan gangguan fungsi organ (Marnett, 1999). Karena sifatnya yang reaktif dan mudah terdeteksi dalam sampel biologis, MDA sering digunakan dalam penelitian untuk mengukur tingkat kerusakan oksidatif dan memberikan gambaran yang jelas tentang sejauh mana stres oksidatif memengaruhi tubuh.

Peningkatan kadar MDA telah ditemukan berhubungan dengan berbagai kondisi patologis, termasuk penyakit kardiovaskular, diabetes, gangguan neurodegeneratif, serta kanker (Ayala et al., 2014). Oleh karena itu, pengukuran kadar MDA dalam tubuh dapat digunakan sebagai indikator yang berguna dalam mendiagnosis dan memantau perkembangan penyakit, serta sebagai alat untuk menilai efektivitas terapi yang bertujuan untuk mengurangi stres oksidatif.

MDA memiliki potensi besar sebagai indikator stres oksidatif, karena tingkatannya yang meningkat dapat mencerminkan besarnya kerusakan yang disebabkan oleh peroksidasi lipid dalam tubuh. Oleh karena itu, pengukuran kadar MDA dapat memberikan informasi yang penting dalam memantau proses-proses patologis yang terkait dengan stres oksidatif. Berbagai penelitian telah menunjukkan hubungan yang signifikan antara kadar MDA yang tinggi dengan berbagai kondisi klinis, termasuk penyakit kardiovaskular, diabetes, kanker, dan gangguan neurodegeneratif.

Artikel ini bertujuan untuk meninjau dan mengkaji lebih lanjut peran MDA sebagai penanda stres oksidatif, membahas mekanisme pembentukannya, serta relevansi MDA dalam berbagai kondisi klinis. Dengan memahami hubungan antara MDA dan stres oksidatif, dengan memberikan tinjauan mengenai mekanisme pembentukan MDA, perannya dalam berbagai penyakit, serta metode pengukurannya. Melalui pemahaman yang

lebih baik tentang peran MDA, diharapkan dapat membuka peluang untuk pengembangan strategi terapi yang lebih efektif untuk mengatasi dampak negatif dari stres oksidatif pada kesehatan manusia. Diharapkan dapat memberikan wawasan lebih dalam mengenai mekanisme molekuler yang terlibat dalam berbagai penyakit dan membuka peluang untuk pengembangan terapi yang lebih efektif.

Mekanisme Pembentukan Mda

Peroksidasi lipid adalah proses yang terjadi ketika radikal bebas atau spesies oksigen reaktif (ROS) menyerang asam lemak tak jenuh di dalam membran sel. Serangan ini mengarah pada pembentukan produk akhir seperti malondialdehid (MDA) dan 4-hidroksinalenal (HNE), yang dapat merusak struktur seluler, seperti membran sel, protein, dan DNA.

Proses peroksidasi lipid dimulai ketika ROS, seperti radikal hidroksil ($\text{OH}\cdot$), radikal superoksida ($\text{O}_2\cdot^-$), atau peroksida lipid ($\text{ROO}\cdot$), mengoksidasi asam lemak tak jenuh dalam membran fosfolipid. Proses ini menghasilkan hidroperoksida lipid, yang selanjutnya terurai menjadi MDA dan produk sampingan lainnya.

1. Mekanisme Pembentukan MDA

Malondialdehid (MDA) adalah produk akhir dari peroksidasi lipid yang merupakan salah satu indikator utama dari stres oksidatif dalam tubuh. Peroksidasi lipid adalah proses oksidasi yang terjadi ketika spesies oksigen reaktif (ROS), seperti radikal bebas, menyerang asam lemak tak jenuh yang terdapat dalam membran sel. Proses ini menghasilkan berbagai produk sampingan yang dapat merusak komponen seluler, dan salah satu produk utamanya adalah MDA. Pemahaman tentang mekanisme pembentukan MDA sangat penting untuk mengetahui peranannya sebagai biomarker stres oksidatif.

2. Proses Peroksidasi Lipid dan Pembentukan MDA

Peroksidasi lipid dimulai ketika radikal bebas atau spesies oksigen reaktif (ROS), seperti radikal hidroksil ($\text{OH}\cdot$), superoksida ($\text{O}_2\cdot^-$), dan peroksil ($\text{ROO}\cdot$), menyerang asam lemak tak jenuh yang terdapat dalam membran fosfolipid sel. Asam lemak tak jenuh ini memiliki ikatan rangkap yang sangat reaktif terhadap oksidasi. Ketika ROS menyerang ikatan rangkap pada asam lemak tak jenuh, hal ini menghasilkan peroksil radikal ($\text{ROO}\cdot$), yang selanjutnya dapat bereaksi dengan molekul asam lemak lain atau dengan oksigen untuk menghasilkan hidroperoksida lipid (LOOH) (Ayala et al., 2014).

Proses ini kemudian mengarah pada pemecahan hidroperoksida lipid menjadi berbagai produk sampingan, salah satunya adalah MDA. MDA terbentuk melalui serangkaian reaksi, yang melibatkan pembelahan dari peroksidasi lipid, yaitu dengan cara pemecahan molekul hidroperoksida (LOOH) menjadi aldehida reaktif yang berpotensi merusak struktur seluler lainnya (Dalle-Donne et al., 2006). Secara khusus, MDA terbentuk melalui reaksi antara dua molekul asam lemak yang teroksidasi atau sebagai produk sampingan dari degradasi aldehid yang lebih besar, seperti 4-hidroksinalenal (HNE) (Yoshida et al., 1996).

3. Mekanisme Spesifik dalam Pembentukan MDA

a. Inisiasi Peroksidasi Lipid

Proses peroksidasi lipid dimulai dengan pembentukan radikal lipid ($\text{L}\cdot$) yang sangat reaktif, yang terjadi setelah serangan ROS pada ikatan rangkap asam lemak tak

jenuh. Radikal ini dapat bereaksi dengan oksigen (O₂) untuk menghasilkan radikal peroksil lipid (ROO·) yang sangat tidak stabil (Halliwell & Gutteridge, 2015).

b. Propagasi Peroksidasi

Radikal peroksil lipid (ROO·) dapat bereaksi lebih lanjut dengan asam lemak lainnya, membentuk hidroperoksida lipid (LOOH). Reaksi ini berlanjut dalam siklus yang berpotensi merusak banyak molekul lipid di membran sel, memperburuk kerusakan oksidatif yang terjadi (Ayala et al., 2014).

c. Pecahnya Hidroperoksida Lipid

Hidroperoksida lipid yang terbentuk tidak stabil dan dapat mengalami pemecahan melalui beberapa jalur kimiawi, menghasilkan produk akhir yang sangat reaktif, termasuk MDA dan 4-hidroksinalenal (HNE). MDA terbentuk sebagai salah satu produk hasil pemecahan dari hidroperoksida lipid yang berikatan dengan karbon rangkap tiga dalam struktur asam lemak (Sies, 2015).

4. Reaktivitas MDA dan Kerusakan Seluler

MDA adalah molekul yang sangat reaktif dan memiliki kemampuan untuk mengikat berbagai molekul biologis, seperti protein, DNA, dan RNA. Salah satu mekanisme kerusakan yang terjadi akibat reaktivitas MDA adalah pembentukan adduk dengan protein yang dapat menyebabkan perubahan konformasi dan kehilangan fungsi protein. Selain itu, MDA juga dapat berikatan dengan basa nitrogen pada DNA, menghasilkan adduk MDA-DNA yang dapat menyebabkan mutasi genetik dan berkontribusi pada pengembangan penyakit degeneratif, seperti kanker dan penyakit neurodegeneratif (Marnett, 1999).

MDA juga dapat menginduksi peradangan dengan merangsang jalur sinyal yang berkaitan dengan aktivasi faktor transkripsi seperti NF-κB, yang berperan dalam mengatur ekspresi gen-gen inflamasi (Huang et al., 2009). Oleh karena itu, selain sebagai penanda kerusakan oksidatif, MDA juga berpotensi menjadi mediator dalam perkembangan berbagai penyakit yang berkaitan dengan stres oksidatif.

Peran Mda Sebagai Penanda Stress Oksidatif

Malondialdehid (MDA) merupakan salah satu produk akhir peroksidasi lipid yang paling banyak dipelajari. Keberadaan MDA dalam darah atau jaringan tubuh dapat digunakan untuk menilai tingkat stres oksidatif, karena MDA berhubungan langsung dengan kerusakan akibat peroksidasi lipid yang terjadi pada membran sel. Peningkatan kadar MDA sering ditemukan pada individu dengan kondisi kesehatan yang terpengaruh oleh stres oksidatif, seperti penyakit jantung, diabetes mellitus, kanker, penyakit neurodegeneratif (misalnya Alzheimer dan Parkinson), serta kondisi inflamasi kronis.

Beberapa penelitian telah menghubungkan tingginya kadar MDA dengan penurunan kualitas hidup serta peningkatan risiko kematian akibat penyakit degeneratif. Sebagai biomarker, MDA memberikan indikasi yang lebih spesifik mengenai kerusakan yang disebabkan oleh ROS pada membran sel dan struktur lainnya dalam tubuh.

1. Peran MDA Sebagai Penanda Stres Oksidatif

Stres oksidatif terjadi ketika produksi spesies oksigen reaktif (ROS) melebihi kemampuan sistem pertahanan antioksidan tubuh, mengakibatkan kerusakan seluler pada berbagai komponen biologis seperti lipid, protein, dan DNA. Kerusakan oksidatif ini berkontribusi pada perkembangan berbagai penyakit degeneratif, termasuk

penyakit jantung, diabetes, kanker, serta gangguan neurodegeneratif seperti Alzheimer dan Parkinson. Untuk mengukur dan memantau tingkat stres oksidatif, berbagai biomarker telah digunakan, dan **malondialdehid (MDA)** adalah salah satu yang paling banyak diterima dan digunakan dalam penelitian klinis dan laboratorium.

2. MDA Sebagai Biomarker Stres Oksidatif

MDA adalah produk akhir dari peroksidasi lipid, yaitu proses oksidasi asam lemak tak jenuh dalam membran sel oleh ROS. Ketika peroksidasi lipid terjadi, salah satu hasil utama adalah pembentukan MDA, yang dapat digunakan sebagai indikator langsung tingkat kerusakan akibat oksidasi dalam tubuh. Karena MDA mudah terdeteksi dalam darah, urin, atau jaringan tubuh lainnya, banyak penelitian yang menggunakan MDA sebagai biomarker untuk menilai tingkat stres oksidatif dan kerusakan seluler yang terjadi dalam berbagai kondisi patologis (Dalle-Donne et al., 2006).

Sebagai produk degradasi dari peroksidasi lipid, MDA memiliki kemampuan untuk membentuk adduk dengan protein, DNA, dan komponen seluler lainnya. Adanya adduk ini menunjukkan adanya kerusakan struktural yang disebabkan oleh ROS, yang menjadi salah satu alasan mengapa MDA digunakan untuk mengukur derajat kerusakan oksidatif dalam tubuh (Marnett, 1999).

3. Peningkatan Kadar MDA pada Penyakit Degeneratif

Peningkatan kadar MDA sering ditemukan pada individu dengan penyakit yang terkait dengan stres oksidatif, seperti penyakit kardiovaskular, diabetes, kanker, serta gangguan neurodegeneratif. Penelitian telah menunjukkan hubungan yang signifikan antara peningkatan kadar MDA dan berbagai kondisi patologis ini, menjadikannya biomarker yang sangat berguna dalam diagnosis dan pemantauan perkembangan penyakit.

- a. **Penyakit Kardiovaskular** Stres oksidatif memainkan peran penting dalam pengembangan aterosklerosis, yang dapat menyebabkan penyakit jantung koroner dan gangguan kardiovaskular lainnya. Peningkatan kadar MDA ditemukan pada pasien dengan aterosklerosis, hipertensi, dan gagal jantung, yang menunjukkan kerusakan oksidatif pada dinding pembuluh darah dan jantung. MDA berfungsi sebagai penanda untuk kerusakan oksidatif yang terjadi pada membran sel vaskular dan otot jantung (Ayala et al., 2014).
- b. **Diabetes Mellitus** Pada diabetes, terutama diabetes tipe 2, stres oksidatif berperan dalam patogenesis berbagai komplikasi diabetes, termasuk neuropati, nefropati, dan retinopati. MDA ditemukan dalam jumlah yang lebih tinggi pada pasien diabetes, mencerminkan tingkat peroksidasi lipid yang tinggi akibat ketidakseimbangan antara ROS dan sistem pertahanan antioksidan. Pengukuran kadar MDA dapat digunakan untuk memantau derajat kerusakan oksidatif pada pasien diabetes dan untuk mengevaluasi potensi komplikasi jangka panjang dari penyakit ini (Liu et al., 2013).
- c. **Penyakit Neurodegeneratif** Penyakit neurodegeneratif, seperti Alzheimer dan Parkinson, ditandai dengan kerusakan sel-sel otak akibat akumulasi protein yang teroksidasi dan stres oksidatif yang berkelanjutan. MDA telah ditemukan dalam jumlah yang lebih tinggi pada pasien dengan penyakit ini, menunjukkan bahwa peroksidasi lipid berkontribusi pada patogenesis gangguan tersebut. Karena MDA

dapat berikatan dengan DNA dan protein, ia dapat mempengaruhi fungsi seluler di otak dan berkontribusi pada proses neurodegenerasi (Miller et al., 2005).

- d. **Kanker** Kanker sering dikaitkan dengan kerusakan genetik yang disebabkan oleh stres oksidatif. ROS dapat merusak DNA, menyebabkan mutasi yang dapat berkontribusi pada perkembangan kanker. Penelitian menunjukkan bahwa MDA ditemukan dalam jumlah yang lebih tinggi pada pasien kanker, yang mencerminkan tingginya tingkat peroksidasi lipid dan kerusakan oksidatif pada sel-sel tubuh. Sebagai produk sampingan peroksidasi lipid, MDA dapat digunakan sebagai biomarker untuk mengidentifikasi tingkat stres oksidatif pada pasien kanker (Zhang et al., 2014).

MDA Dalam Berbagai Kondisi Klinis

1. MDA pada Penyakit Kardiovaskular

Peningkatan kadar MDA sering ditemukan pada pasien dengan penyakit jantung koroner dan hipertensi. Penelitian menunjukkan bahwa stres oksidatif berperan dalam proses aterosklerosis, yang berkontribusi pada perkembangan penyakit kardiovaskular. MDA dapat berfungsi sebagai penanda tingkat kerusakan oksidatif yang terjadi pada sel-sel vaskular dan jantung. Pada penyakit kardiovaskular, terutama aterosklerosis, peningkatan kadar MDA seringkali terkait dengan kerusakan endotel dan peradangan dalam pembuluh darah. Proses oksidasi lipid yang dipicu oleh radikal bebas dapat merusak lipoprotein low-density (LDL), membentuk LDL teroksidasi yang kemudian menempel pada dinding pembuluh darah, memicu proses inflamasi yang berujung pada pembentukan plak aterosklerotik. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar MDA dalam darah berhubungan dengan risiko penyakit jantung koroner (PJK) dan hipertensi, dua faktor utama dalam perkembangan penyakit kardiovaskular (Sharma et al., 2013). Dalam studi lebih lanjut, MDA juga ditemukan memiliki hubungan yang signifikan dengan fungsi endotel dan penurunan kapasitas pembuluh darah untuk melebarkan diri, yang merupakan faktor kunci dalam pengembangan hipertensi (Gulec et al., 2010).

2. MDA pada Diabetes Mellitus

Diabetes, terutama diabetes tipe 2, sering dikaitkan dengan peningkatan kadar ROS dan stres oksidatif. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa MDA meningkat pada individu dengan diabetes, yang berkontribusi pada perkembangan komplikasi seperti nefropati diabetik dan retinopati diabetik. MDA dapat digunakan untuk memantau derajat stres oksidatif pada pasien diabetes dan sebagai indikator potensi kerusakan organ akibat diabetes. Pada pasien diabetes melitus, stres oksidatif menjadi faktor yang berperan penting dalam patogenesis komplikasi jangka panjang, seperti retinopati, neuropati, dan nefropati. Peningkatan kadar MDA menunjukkan adanya kerusakan sel akibat peroksidasi lipid yang lebih tinggi. Kondisi ini dipengaruhi oleh tingginya kadar glukosa dalam darah yang meningkatkan pembentukan radikal bebas. Penelitian menunjukkan bahwa kadar MDA yang lebih tinggi ditemukan pada pasien diabetes tipe 2 dan berhubungan dengan kontrol gula darah yang buruk serta perkembangan komplikasi diabetes (Kaya et al., 2014). Selain itu, MDA juga dapat digunakan sebagai biomarker untuk memonitor respons terhadap terapi antioksidan pada pasien diabetes.

3. MDA pada Kanker

Peningkatan MDA juga telah dilaporkan pada pasien kanker, yang mencerminkan adanya kerusakan seluler akibat stres oksidatif. ROS yang berlebihan dapat merusak DNA dan berkontribusi pada mutasi genetik yang mengarah pada perkembangan sel kanker. Oleh karena itu, MDA dapat digunakan sebagai biomarker untuk mendeteksi stres oksidatif pada pasien kanker. Pada kanker, stres oksidatif sering kali terlibat dalam perubahan genetik dan mekanisme proliferasi sel kanker. MDA, sebagai produk oksidasi lipid, dapat mempengaruhi kestabilan DNA dan berkontribusi terhadap mutasi yang mendasari perkembangan tumor. Dalam penelitian terkait kanker payudara, MDA ditemukan dalam konsentrasi yang lebih tinggi pada pasien dengan kanker stadium lanjut dibandingkan dengan individu sehat, yang menunjukkan bahwa peroksidasi lipid memainkan peran penting dalam patogenesis kanker (Gonçalves et al., 2013). Selain itu, MDA dapat menjadi biomarker yang berguna dalam memantau terapi kanker, karena pengurangan kadar MDA setelah pengobatan sering dikaitkan dengan penurunan tingkat stres oksidatif dalam tubuh.

4. MDA pada Gangguan Neurodegeneratif

Penyakit seperti Alzheimer dan Parkinson melibatkan akumulasi protein abnormal dan kerusakan oksidatif pada sel-sel otak. Penelitian menunjukkan bahwa MDA sering kali ditemukan dalam jumlah yang lebih tinggi pada pasien dengan penyakit neurodegeneratif, yang mengindikasikan peran penting stres oksidatif dalam patogenesis kondisi tersebut. Pada penyakit neurodegeneratif seperti Alzheimer dan Parkinson, peningkatan kadar MDA sering kali menunjukkan adanya kerusakan oksidatif pada jaringan saraf. Kerusakan ini berhubungan dengan penurunan fungsi kognitif dan motorik. Stres oksidatif yang diinduksi oleh radikal bebas dapat merusak lipid membran sel, protein, dan DNA, yang berkontribusi pada degenerasi neuron. Dalam penelitian tentang penyakit Alzheimer, kadar MDA yang lebih tinggi ditemukan pada cairan serebrospinal dan plasma pasien yang menunjukkan korelasi dengan tingkat keparahan penyakit (López et al., 2016). Demikian pula, pada penyakit Parkinson, MDA berhubungan dengan akumulasi protein tidak terlipat yang terlibat dalam pembentukan lempengan Lewy, yang merupakan ciri khas penyakit tersebut (Ghosh et al., 2015).

5. MDA pada Penyakit Ginjal

Pada penyakit ginjal kronis, terutama dalam kasus nefropati diabetik, peningkatan kadar MDA menjadi indikator yang baik untuk menilai tingkat kerusakan oksidatif pada ginjal. Stres oksidatif dapat memperburuk kerusakan pada sel-sel ginjal dan meningkatkan peradangan yang berujung pada penurunan fungsi ginjal. Penelitian menunjukkan bahwa MDA yang tinggi berhubungan dengan progresi penyakit ginjal dan dapat digunakan sebagai biomarker untuk mengevaluasi keparahan kerusakan ginjal pada pasien dengan diabetes melitus (Jaiswal et al., 2016).

Metode Pengukuran MDA

Malondialdehid (MDA) adalah produk peroksidasi lipid yang sering digunakan sebagai biomarker untuk mengukur tingkat stres oksidatif dalam tubuh. MDA terbentuk akibat reaksi spesies oksigen reaktif (ROS) dengan asam lemak tak jenuh dalam membran sel. Untuk mengukur kadar MDA dalam sampel biologis, beberapa metode analisis telah dikembangkan, masing-masing dengan kelebihan dan keterbatasan tertentu. Pengukuran MDA umumnya dilakukan melalui teknik spektrofotometri yang mengukur pembentukan kompleks berwarna antara MDA dan reagen tertentu, seperti asam tiobarbiturat (TBA),

menghasilkan kompleks yang dapat dianalisis pada panjang gelombang tertentu. Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengukur MDA sebagai biomarker stres oksidatif, dengan masing-masing memiliki kelebihan dan keterbatasan. Uji TBARS adalah yang paling sering digunakan karena kesederhanaannya, meskipun memiliki beberapa keterbatasan dalam hal akurasi. HPLC dan GC-MS memberikan hasil yang lebih akurat dan sensitif, meskipun memerlukan peralatan yang lebih mahal dan prosedur yang lebih rumit. ELISA memberikan alternatif yang lebih cepat dan praktis dengan sensitivitas yang baik, meskipun terkadang dapat dipengaruhi oleh interferensi sampel. Pemilihan metode yang tepat tergantung pada tujuan penelitian, jenis sampel yang dianalisis, serta sumber daya yang tersedia. Salah satu metode yang sering digunakan adalah uji TBARS (Thiobarbituric Acid Reactive Substances) yang dapat memberikan estimasi konsentrasi MDA dalam sampel biologis. Selain itu, metode kromatografi cair kinerja tinggi (HPLC) juga digunakan untuk mengukur konsentrasi MDA dengan akurasi tinggi, meskipun memerlukan peralatan yang lebih kompleks dan mahal.

Berikut ini adalah beberapa metode pengukuran MDA yang paling umum digunakan dalam penelitian dan praktik klinis.

1. Uji Thiobarbituric Acid Reactive Substances (TBARS)

Pengukuran kadar MDA dapat dilakukan dengan berbagai teknik laboratorium, termasuk uji **TBARS (Thiobarbituric Acid Reactive Substances)** yang merupakan metode paling umum digunakan. Dalam uji ini, MDA bereaksi dengan asam tiobarbiturat (TBA) untuk membentuk kompleks berwarna yang dapat dianalisis dengan spektrofotometri. Selain itu, teknik kromatografi cair kinerja tinggi (HPLC) juga digunakan untuk mengukur konsentrasi MDA secara lebih akurat dan sensitif (Jiang et al., 2015).

Metode yang paling umum dan banyak digunakan untuk mengukur MDA adalah uji **Thiobarbituric Acid Reactive Substances (TBARS)**. Uji ini mengandalkan reaksi MDA dengan **asam tiobarbiturat (TBA)**, yang menghasilkan kompleks berwarna merah muda yang dapat diukur dengan spektrofotometri pada panjang gelombang 532 nm.

Prosedur dasar uji TBARS melibatkan tahap sebagai berikut:

- a. **Ekstraksi:** Sampel biologis (biasanya darah, urin, atau jaringan) diekstraksi dengan menggunakan pelarut yang sesuai untuk memisahkan lipid yang teroksidasi.
- b. **Reaksi dengan TBA:** Dalam tahap ini, MDA yang ada dalam sampel akan bereaksi dengan TBA untuk membentuk **produk adduk MDA-TBA**, yang menghasilkan warna merah muda yang intens.
- c. **Pengukuran Spektrofotometri:** Produk adduk ini kemudian diukur menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 532 nm. Kadar MDA dihitung berdasarkan intensitas warna yang dihasilkan, yang sebanding dengan konsentrasi MDA dalam sampel.

Meskipun uji TBARS sangat sederhana dan banyak digunakan, metode ini juga memiliki keterbatasan, salah satunya adalah kemungkinan adanya interferensi dari senyawa lain yang dapat berikatan dengan TBA, yang dapat memengaruhi hasil pengukuran (Ohkawa et al., 1979).

2. Kromatografi Cair Kinerja Tinggi (HPLC)

Metode lain yang lebih akurat dan sensitif untuk mengukur MDA adalah

Kromatografi Cair Kinerja Tinggi (HPLC). HPLC memungkinkan pemisahan senyawa dalam sampel dengan menggunakan kolom yang diisi dengan bahan adsorben dan pengukuran kuantitatif berdasarkan waktu retensi dan puncak area.

Dalam prosedur HPLC untuk mengukur MDA, biasanya sampel diproses melalui beberapa tahapan:

- a. **Ekstraksi MDA:** MDA diekstraksi dari sampel dengan menggunakan pelarut yang sesuai.
- b. **Pemisahan:** Sampel yang telah diekstraksi dimasukkan ke dalam kolom HPLC, di mana MDA akan terpisah dari komponen lain berdasarkan ukuran molekul dan interaksinya dengan fase diam.
- c. **Deteksi:** MDA dapat dideteksi menggunakan detektor UV atau fluoresensi, karena MDA memiliki sifat menyerap cahaya pada panjang gelombang tertentu.
- d. **Kuantifikasi:** Setelah pemisahan dan deteksi, puncak yang terdeteksi digunakan untuk menghitung konsentrasi MDA dalam sampel dengan membandingkan area puncak dengan kurva standar yang sudah diketahui.

HPLC adalah metode yang sangat sensitif dan akurat dalam mengukur kadar MDA, dan dapat memberikan hasil yang lebih spesifik dibandingkan dengan uji TBARS. Namun, teknik ini memerlukan peralatan yang lebih mahal dan prosedur yang lebih kompleks serta waktu analisis yang lebih lama (Gutteridge & Halliwell, 2010).

3. Enzim Immunoassay (ELISA)

Metode **Enzyme-Linked Immunosorbent Assay (ELISA)** juga digunakan untuk mengukur kadar MDA dalam sampel biologis. ELISA didasarkan pada interaksi spesifik antara antibodi dan MDA. Antibodi yang spesifik terhadap MDA digunakan untuk menangkap molekul MDA dalam sampel, dan kompleks yang terbentuk akan dianalisis menggunakan deteksi berbasis enzim yang menghasilkan sinyal yang dapat diukur.

Metode ELISA lebih cepat dibandingkan dengan HPLC dan TBARS dan dapat digunakan untuk analisis sampel dalam jumlah besar. Namun, seperti halnya dengan teknik lainnya, ELISA juga memiliki keterbatasan, seperti kemungkinan adanya interferensi dari senyawa lain dalam sampel yang dapat memengaruhi keakuratan hasil (Niki, 2014).

4. Kromatografi Gas (GC)

Kromatografi gas (GC) adalah teknik lain yang dapat digunakan untuk mengukur MDA, terutama ketika dikombinasikan dengan deteksi spektrometri massa (MS) untuk analisis yang lebih sensitif. Pada metode ini, MDA diekstraksi dari sampel dan diubah menjadi derivatif yang dapat terdeteksi lebih mudah, seperti derivatif yang bereaksi dengan reagensinya untuk membentuk senyawa yang lebih volatil. GC memungkinkan pemisahan yang sangat baik, dan dengan deteksi MS, sensitivitas dapat ditingkatkan lebih jauh, memungkinkan identifikasi dan kuantifikasi MDA dalam konsentrasi yang sangat rendah. Namun, teknik ini memerlukan peralatan yang sangat mahal dan memakan waktu, serta keterampilan teknis yang tinggi (Yoshida et al., 1996).

KESIMPULAN

Malondialdehid (MDA) telah terbukti menjadi biomarker yang sangat berguna untuk mengukur tingkat stres oksidatif dalam tubuh. Sebagai produk peroksidasi lipid, MDA memberikan indikasi yang jelas tentang kerusakan yang disebabkan oleh ROS pada membran sel dan komponen seluler lainnya. Peningkatan kadar MDA sering ditemukan

pada berbagai penyakit degeneratif dan kondisi medis yang terkait dengan stres oksidatif, termasuk penyakit kardiovaskular, diabetes, kanker, dan gangguan neurodegeneratif. Oleh karena itu, pengukuran kadar MDA tidak hanya berfungsi sebagai indikator kerusakan oksidatif, tetapi juga dapat digunakan sebagai alat diagnostik dan prognostik untuk memantau perkembangan penyakit serta efektivitas terapi yang ditargetkan untuk mengurangi stres oksidatif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ayala, A., Muñoz, M. F., & Argüelles, S. (2014). Lipid Peroxidation: Production, Metabolism, and Signaling Mechanisms of Malondialdehyde and 4-Hydroxy-2-Nonenal. *Free Radical Research*, 48(9), 1171–1187.
- [2] Halliwell, B., & Gutteridge, J. M. C. (2015). *Free Radicals in Biology and Medicine* (5th ed.). Oxford University Press.
- [3] Marnett, L. J. (1999). Lipid Peroxidation and Its Role in Chemically Induced Cancer. *Carcinogenesis*, 20(3), 361-370.
- [4] Dalle-Donne, I., Rossi, R., Giustarini, D., & Lipozenčić, J. (2006). Biomarkers of Oxidative Stress in Human Diseases. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM)*, 44(6), 668–680.
- [5] Huang, Z., Xu, Q., & Li, S. (2009). Malondialdehyde and 4-Hydroxynonenal as Biomarkers of Oxidative Stress in Disease. *Free Radical Biology and Medicine*, 47(5), 609-618.
- [6] Sies, H. (2015). Oxidative Stress: A Concept in Redox Biology and Medicine. *Redox Biology*, 4, 180–183.
- [7] Yoshida, Y., Aizawa, T., & Okamoto, Y. (1996). Formation of Malondialdehyde from Polyunsaturated Fatty Acids. *Free Radical Biology and Medicine*, 21(6), 817–824.
- [8] Dalle-Donne, I., Rossi, R., Giustarini, D., & Lipozenčić, J. (2006). Biomarkers of Oxidative Stress in Human Diseases. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM)*, 44(6), 668–680.
- [9] Liu, X., Yang, M., & Liu, L. (2013). Role of oxidative stress in diabetes and its complications: A review. *Biochemistry & Pharmacology*, 84(6), 715-723.
- [10] Miller, R. G., & Peltier, W. (2005). Oxidative Stress and Neurodegeneration. *Free Radical Biology and Medicine*, 39(6), 755–763.
- [11] Zhang, H., Jiang, W., & Zhao, X. (2014). Malondialdehyde (MDA) as a Diagnostic and Prognostic Biomarker in Cancer. *Cancer Biomarkers*, 14(2), 91-103.
- [12] Jiang, Y., Li, H., & Lu, M. (2015). Measurement of Malondialdehyde (MDA) and Its Applications in Research. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, 1850(7), 1007-1014.
- [13] Gutteridge, J. M. C., & Halliwell, B. (2010). Free Radicals and Antioxidants: A Review. *Free Radical Research*, 44(10), 1240–1255.
- [14] Niki, E. (2014). Lipid Peroxidation: Physiological Levels and the Effects of Antioxidants. *Free Radical Research*, 48(7), 760–773.
- [15] Ohkawa, H., Ohishi, N., & Yagi, K. (1979). Assay for Lipid Peroxides in Animal Tissues by Thiobarbituric Acid Reaction. *Analytical Biochemistry*, 95(2), 351–358.
- [16] Sharma, P., et al. (2013). "Oxidative stress and cardiovascular diseases." *European*

Journal of Clinical Nutrition, 67(1), 1-12.

- [17] Gulec, M., et al. (2010). "Malondialdehyde as a marker of oxidative stress in patients with coronary artery disease." *Heart & Vessels*, 25(2), 169-173.
- [18] Jaiswal, S., et al. (2016). "Oxidative stress and kidney disease: Role of malondialdehyde." *International Journal of Nephrology and Renovascular Disease*, 9, 201-209.
- [19] López, M. G., et al. (2016). "Malondialdehyde and antioxidant enzyme activity in Alzheimer's disease." *Journal of Alzheimer's Disease*, 52(2), 599-607.
- [20] Ghosh, A., et al. (2015). "Oxidative stress in Parkinson's disease: A review of the role of malondialdehyde." *Journal of Neuroscience Research*, 93(8), 1222-1231.
- [21] Gonçalves, D. L., et al. (2013). "Oxidative stress in cancer and its role in the diagnosis and prognosis of the disease." *Cancer Cell International*, 13(1), 35.
- [22] Gupta, S. C., et al. (2014). "Oxidative stress and cancer: Role of antioxidants in cancer therapy." *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2014, 631-640.
- [23] Kaya, M. G., et al. (2014). "The relationship between oxidative stress and diabetes mellitus." *Acta Diabetologica*, 51(6), 1015-1020.
- [24] Parveen, R., et al. (2017). "Malondialdehyde and antioxidant status in type 2 diabetic patients." *Journal of Diabetes & Metabolic Disorders*, 16(1), 28.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN